

بررسی آزمایشگاهی تأثیر موقعیت آستانه بر توسعه زمانی عمق چاله آبستگي اطراف گروه پایه کج با پی

مهدی اسمعیلی ورکی^{1*}، سیده سمیرا سعادت پاجه کناری²، رامین فضل اولی³

1- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان
2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
3- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

* esmaeili@guilan.ac.ir

چکیده - پل‌ها یکی از سازه‌های مهم در حوزه ارتباطات زمینی می‌باشند. با احداث این سازه‌ها در رودخانه، الگوی جریانی با ساختاری سه‌بعدی در مجاورت پایه‌های آن شکل می‌گیرد که در نتیجه افزایش سرعت جریان و تشکیل گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی، بخشی از رسوبات اطراف پایه و پی آن دچار آبستگي می‌شود و در صورت در نظر نگرفتن عمق کافی برای پی یا شمع‌ها، تخریب پایه‌های پل، به‌ویژه در زمان سیلاب را به دنبال خواهد داشت. از این رو در کنار تحقیقات انجام شده در خصوص شناخت عوامل اثرگذار بر آبستگي پایه‌های پل، اتخاذ تمهیدات مناسب برای کاهش آبستگي از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیر موقعیت آستانه بر توسعه زمانی آبستگي اطراف گروه پایه کج در شرایط مختلف هیدرولیکی و رقوم کارگذاری پی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. گروه پایه مورد بررسی متشکل از دو پایه کج مستطیلی با ابعاد 2/5 در 3/5 سانتی‌متر و زاویه تمایل 28 درجه بر روی پی با ابعاد 10 در 16 سانتیمتر، بود. آزمایش‌ها تحت شرایط مختلف موقعیت آستانه (مقابل، وسط و پایین دست پی)، سرعت، عمق جریان و نیز رقوم‌های نسبی مختلف کارگذاری پی (فاصله روی پی تا سطح بستر نسبت به عرض پایه)، 1-، 0/5-، صفر و 1+، انجام شد. بررسی نتایج نشان داد که موقعیت قرارگیری آستانه تأثیر محسوسی بر روند توسعه زمانی چاله آبستگي دارد. مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که کارگذاری آستانه در مقابل پی نسبت به سایر موقعیت‌های نصب آستانه، کارایی بیشتری در کاهش آبستگي دارد. مقایسه نتایج نشان داد برای کلیه ترازهای کارگذاری پی، بطور متوسط مقدار عمق لحظه‌ای آبستگي با استقرار آستانه جلویی 22 درصد، آستانه میانی، 18 درصد و آستانه انتهایی 15 درصد کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: آبستگي، آستانه، توسعه زمانی، رقوم کارگذاری، گروه پایه کج، پی.

1- مقدمه

دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی، به ویژه حداکثر مقدار آبستگي در مرحله طراحی و ساخت آنها می‌باشد. مجموعه آبستگي که در آبراهه‌های طبیعی به وقوع می‌پیوندد، شامل سه بخش آبستگي عمومی

آبستگي در اطراف پایه‌های پل یکی از پارامترهای مهم در طراحی ایمن این نوع از سازه‌ها می‌باشد. طبق گزارش‌های منتشر شده، تخریب پل‌ها در بیشتر موارد به

روش دوم کاهش آبخستگی در مجاورت پایه‌های پل، شامل افزایش مقاومت بستر در مقابل فرسایش، نظیر استفاده از طوقه، سنگچین و آستانه می‌باشد (رازی و همکاران، 1389، Grimaldi et al., 2006, Zarrati et al., 2009, Mashahir et al., 2010, Masjedi et al., 2010, Simarro et al., 2011, Pagliara et al., 2010). از میان روش‌های مذکور، استفاده از آستانه، کاربرد زیادی در کاهش آبخستگی و ممانعت از گسترش چاله آبخستگی به بالادست پل دارد که در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده در این رابطه پرداخته می‌شود.

گریمالدی و همکاران (2009)، کنترل آبخستگی با استفاده از آستانه در پایین‌دست پایه پل را مطالعه نمودند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که در شرایطی که آستانه در فاصله نزدیک در پایین‌دست پایه قرار گیرد، آبخستگی به مقدار 26 درصد و حجم چاله‌ی آن 80 درصد کاهش می‌یابد (Grimaldi et al., 2009).

پاگلارا و همکاران (2010)، به بررسی تأثیر آستانه گابیونی در پایین‌دست پایه پل بر کاهش آبخستگی پرداختند. نتایج حاصله حاکی از آن است که آستانه فرایند آبخستگی را کند نموده و به تأخیر می‌اندازد، ولی در صورت توسعه آبخستگی به زیر آستانه، آبخستگی به سرعت پیش رفته و به همان عمق چاله بدون آستانه می‌رسد (Pagliara et al., 2010).

رازی و همکاران (1389)، تأثیر موقعیت قرارگیری آبپایه در کاهش عمق آبخستگی در پایه‌های استوانه‌ای را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد که بهترین موقعیت قرارگیری آستانه در موقعیت متصل به پایه بالادست می‌باشد. در این حالت عمق آبخستگی حدود 30 درصد کاهش می‌یابد.

در کنار توسعه روش‌های مختلف کاهش آبخستگی اطراف پایه‌های پل، آگاهی از تأثیر آنها بر توسعه زمانی ابعاد چاله آبخستگی می‌تواند نقش مهمی در انتخاب روش حفاظت از پایه‌های پل داشته باشد. تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با مطالعه تغییرات زمانی ابعاد چاله آبخستگی در اطراف پایه‌های پل با مقاطع عرضی یکنواخت و غیر یکنواخت صورت گرفته است که نتایج آن در قالب روابط

(تغییرات دراز مدت بالآمدگی و پایین‌افتادگی بستر رودخانه به علل طبیعی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت شن و ماسه)، آبخستگی ناشی از تنگ شدگی مسیر رودخانه و آبخستگی موضعی (در اطراف پل‌ها و تکیه‌گاه‌ها)، می‌باشد (Breusers and Raudkivi, 1991).

در آبخستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل، در اثر برخورد آب به پایه، به دلیل ایجاد گردان فشار، جریان رو به پایین ایجاد می‌شود. این جریان‌های رو به پایین پس از برخورد به بستر با جریان اصلی ترکیب شده و گردابه نعل اسبی را به وجود می‌آورد. گردابه‌های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه پل فعالیت دارند. در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل، گردابه برخاستگی ایجاد می‌شود. این نوع سیستم گردابی مانند یک گردباد عمل می‌کند و با ایجاد مکش، رسوبات را از کف به سمت بالا حرکت می‌دهد. به عبارت دیگر جهت حرکت این سیستم گردابی رو به بالا است. بررسی‌ها نشان می‌دهد گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای را در ایجاد حفره آبخستگی اطراف پایه پل دارند (Melville and Raudkivi, 1996).

اقدامات مقابله با آبخستگی و تخریب پایه‌های پل را می‌توان در چهار دسته 1- کاهش قدرت گردابه‌ها در مجاورت پایه با ایجاد شکاف یا اصلاح هندسه پایه، 2- افزایش مقاومت بستر به فرسایش یا ایجاد پوشش سنگ‌چین، طوقه و آستانه 3- حفظ شرایط زیست محیطی و ریخت‌شناسی رودخانه‌ها و 4- بازرسی و پایش بستر رودخانه، طبقه‌بندی نمود (Lagasse, et al., 2009, Simarro et al., 2011 and Lee et al., 2009). از تحقیقات انجام شده برای کاهش قدرت گردابه‌ها در مجاورت پایه می‌توان به بررسی تأثیر سازه‌های منحرف‌کننده‌ی جریان بر کاهش آبخستگی در اطراف پایه‌های پل (کشاورزی و همکاران، 1388، دبردانی و همکاران، 1389)، کنترل و کاهش آبخستگی موضعی در پایه‌ها با ایجاد شکاف در پایه (حیدرپور و همکاران 1382، El-Razek et al., 2010)، اشاره نمود. آزمایش‌های انجام شده توسط محققان یاد شده نشان داد که این روش‌ها می‌توانند مقدار آبخستگی اطراف پایه‌ها را به مقدار زیادی کاهش دهند.

است که آنها را می‌توان به صورت رابطه تابعی (1) نوشت:

$$f_1(y, d_s, B, D, D_*, d_{50}, z, U, U_C, L, \rho, \rho_s, \mu, g, \sigma_g, \alpha, \beta, t, t_e) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه y عمق جریان، d_s عمق لحظه‌ای آبخستگی، B عرض فلوم آزمایشگاهی، D عرض پایه پل، D_* عرض پی، D_{50} قطری که 50 درصد ذرات مصالح بستر از آن کوچکتر است، z تراز استقرار پی، U و U_C به ترتیب سرعت متوسط جریان و سرعت جریان برای شرایط آستانه حرکت، L فاصله قرارگیری آستانه نسبت به دماغه پایه یا پی، ρ و ρ_s به ترتیب چگالی آب و ذرات رسوبی، μ لزوجت دینامیکی، g ، شتاب ثقل، σ_g انحراف معیار مصالح رسوبی بستر، α زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان، β زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان، t زمان از شروع آبخستگی و t_e زمان تعادل آبخستگی می‌باشد.

با بکارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (1) را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعد (2) نوشت:

$$f_2\left(\frac{y}{D_*}, \frac{UD_*}{v}, \frac{U}{\sqrt{gD_*}}, \frac{Ut}{D_*}, \frac{Ut_e}{D_*}, \frac{U}{U_C}, \frac{d_s}{D_*}, \frac{D_{50}}{D_*}, \frac{D}{D_*}, \frac{z}{D_*}, \frac{L}{D_*}, \frac{B}{D_*}, \frac{\rho}{\rho_s}, \sigma_g, \alpha, \beta\right) = 0 \quad (2)$$

با انجام ساده‌سازی و نیز ترکیب پارامترهای بی‌بعد، معادله (2) را می‌توان به صورت معادله (3) خلاصه کرد:

$$f_3\left(\frac{y}{D_*}, Fr, Re, \frac{U}{U_C}, \frac{t}{t_e}, \frac{d_s}{D_*}, \frac{D_{50}}{D_*}, \frac{D}{D_*}, \frac{z}{D_*}, \frac{L}{D_*}, \frac{B}{D_*}, \frac{\rho}{\rho_s}, \sigma_g, \alpha, \beta\right) = 0 \quad (3)$$

که در آن $Fr = U/\sqrt{gy}$ و $Re = Uy/v$ به ترتیب عدد رینولدز و فرود در بالادست پایه پل می‌باشند. از میان پارامترهای بی‌بعد استخراج شده، اثر انحراف معیار هندسی به علت یکنواختی رسوبات مورد استفاده، D/D_* به علت ثابت بودن ابعاد پایه و پی در طول آزمایش‌ها و زوایای پایه‌های پل در صفحه جریان و قائم، ثابت در نظر گرفته شد. همچنین به علت اینکه عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از مقدار 9100 بیشتر بود (Novak et al., 2010)، لذا از تأثیر این پارامتر صرف‌نظر شده و رابطه (3) به صورت رابطه (4) خلاصه شد.

$$\frac{d_s}{D_*} = f_4\left(\frac{y}{D_*}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \frac{U}{U_C}, \frac{t}{t_e}, \frac{z}{D_*}, \frac{L}{D_*}\right) = 0 \quad (4)$$

تجربی برای تخمین عمق آبخستگی پیش از رسیدن به حداکثر مقدار آن و نیز شناخت گردابه‌های اولیه و ثانویه تشکیل دهنده چاله آبخستگی ارائه شده است (Kothyari et al., 1996b, Cardoso and Bettess, 1999, Mia and Nago, 2003, Chang et al., 2004, Sheppard et al., 2004, Oliveto and Hager, 2002 and 2005, Coleman, 2005, Yanmaz, 2006, Ataie-Ashtiani et al., 2010 and Lu et al., 2011).

امروزه با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال گوناگونی بوده که از جمله آنها می‌توان به پل‌ها با گروه پایه کج اشاره نمود. فرآیند آبخستگی در گروه پایه‌ها علاوه بر عوامل مربوط به پایه منفرد، تحت تأثیر عوامل تقویت‌کنندگی و حفاظ بودن می‌باشد، به طوری که عامل تقویت‌کننده باعث افزایش عمق آبخستگی در مجاورت پایه جلویی و عامل حفاظ بودن با کاهش سرعت برای پایه پایین‌دست منجر به کاهش آبخستگی در محدوده پایه می‌شوند. مقایسه‌های انجام شده در خصوص تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبخستگی اطراف گروه پایه کج نشان داد که مقدار آبخستگی در گروه پایه کج از حالت تک پایه بیشتر بوده که این موضوع به دلیل تأثیر توام دو پایه و نیز کج‌شدگی آن به سمت بالادست می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب پایه‌ها بر روی پی که در زیر بستر و بالاتر از حداکثر عمق آبخستگی به ازای تک پایه قرار دارد، مقدار حداکثر عمق آبخستگی کاهش می‌یابد (اسمعیلی ورکی و همکاران، 1392).

از آنجاکه تاکنون تحقیقی در خصوص تأثیر استفاده از آستانه بر تغییرات زمانی عمق آبخستگی در این نوع از پایه‌ها انجام نشده است، در تحقیق حاضر تأثیر قرارگیری آستانه در بالادست، وسط و پایین‌دست پی پل بر توسعه زمانی آبخستگی اطراف گروه پایه کج تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و تراز کارگذاری پی مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و روشها

2-1- تحلیل ابعادی

عمق آبخستگی در اطراف پایه پل متأثر از عوامل زیادی، شامل پارامترهای توصیف‌کننده هندسه پایه پل، شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات سیال و رسوب بستر و زمان

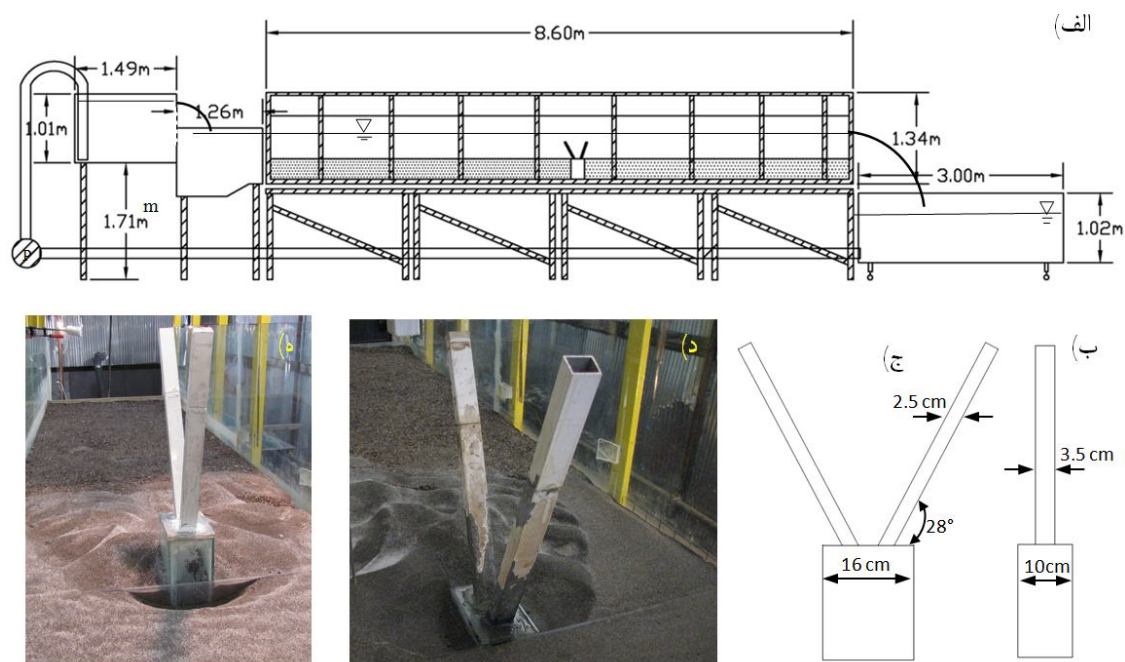
بود، از یک دستگاه کنترل کننده دور موتور برای تنظیم دور الکتروموتور پمپ استفاده گردید که با استفاده از آن امکان تنظیم دقیق دبی جریان، با حداقل اتلاف وقت میسر شد. برای اطمینان از توسعه یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل، محل نصب آن 5 متر بعد از ورودی انتخاب گردید.

گروه پایه کج مورد بررسی در این تحقیق از دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض $2/5$ و $3/5$ سانتی متر که با زاویه 28° درجه بر روی پی مستطیلی شکل به طول و عرض 16 و 10 سانتی متر نصب شده بودند، تشکیل شد. ابعاد پایه نمونه، مقیاس $1/190$ از پل هشتم اهواز می باشد. در انتخاب مقیاس سعی شد که ابعاد نهایی پایه به گونه ای باشد که دیواره ها بر روی آبشستگی تأثیری نداشته باشند، طبق نظر Raudkivi and Ettema (1983) چنانچه نسبت عرض فلوم به عرض پایه از $6/25$ بیشتر باشد، دیواره های فلوم تأثیری بر مقدار آبشستگی نخواهند داشت. مقدار این نسبت برای پایه و پی پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با 26 و 10 بود.

در این تحقیق رابطه (4) به عنوان یک رابطه پایه ای برای انجام آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفت.

2-2- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی و به طول $8/6$ متر، عرض $0/92$ و عمق 1 متر که دارای دیواره هایی از جنس شیشه و کف پلکسی گلاس بود، انجام شد. برای تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ که قادر بود دبی سیستم را تا 70 لیتر بر ثانیه تأمین نماید، استفاده گردید (شکل 1). جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن اندازه گیری بالادست شده که در انتهای آن سرریز مثلثی برای اندازه گیری دبی جریان نصب شد. سپس جریان با عبور از سرریز وارد مخزن آرام کننده پایین دست شده و در ادامه وارد کانال می گردید. برای کاهش تلاطم جریان ورودی از مخزن به فلوم و ممانعت از شکل گیری جریان های عرضی در ورودی آن، از مستقیم سازنده جریان در ابتدای فلوم استفاده شد. برای تنظیم عمق جریان در فلوم از دریچه پروانه ای که در انتهای کانال نصب شده بود، استفاده گردید. با توجه به اینکه در آزمایش ها تنظیم دقیق دبی بسیار حائز اهمیت



شکل 1 نمای از فلوم آزمایشگاهی و استقرار گروه پایه، الف) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی، ب و ج) نمای در مقابل و امتداد جریان گروه پایه و پی، د و ه) نمایی از استقرار گروه پایه در تراز نسبی کارگذاری $z/D_* = 1$ و $z/D_* = 0$

2-3- روش انجام آزمایش‌ها

قبل از شروع آزمایش‌ها لازم بود که سرعت آستانه حرکت برای قطر رسوبات مورد استفاده مشخص شود. بنابراین برای شرایط مختلف عمق و دبی و وضعیت آستانه حرکت بررسی شده و در نهایت مقدار متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت 0/22 متر بر ثانیه تعیین گردید. مقایسه نتایج حاصله با دیاگرام شیلدرز و روابط تجربی مطابقت مطلوبی را نشان داد. در هر آزمایش، ابتدا با تعیین دبی جریان برای سرعت و عمق مورد نظر، آب به تدریج و به آرامی وارد کانال شده و سپس بعد از تنظیم دبی، عمق مورد نظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار می‌گردید. پدیده آبشستگی در اطراف پایه‌های پل فرایندی زمان‌بر بوده و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. محققان معیارهای مختلفی را برای تعیین زمان تعادل پیشنهاد نموده‌اند. (Melvill and Chiew 1999) اشاره نمودند که زمان تعادل زمانی است که میزان آبشستگی در طی دوره زمانی 24 ساعته کمتر از 5 درصد قطر پایه باشد (Raudkivi 1983) and Ettema، زمان تعادل را مدت زمانی معرفی نمودند که در سه ساعت متوالی، بیش از یک میلی‌متر آبشستگی رخ ندهد. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش از معیار (Raudkivi and Ettema 1983) برای تعیین زمان تعادل استفاده شد.

اندازه ذره رسوب یکی از عوامل موثر بر عمق آبشستگی است. برای حذف اثر اندازه رسوب بر عمق آبشستگی موضوعی، طبق تحقیق (Melville and Sutherland 1988)، نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی باید از 20-25 بیشتر باشد. همچنین (Raudkivi and Ettema 1983) اظهار داشتند که برای ممانعت از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر رسوبات باید از 0/7 میلی‌متر بیشتر باشد. رسوبات مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر 0/7 میلی‌متر بود که از مصالح رودخانه‌ای تهیه و بعد از الک کردن در بازه‌ای بطول 1/5 متر از فلوم آزمایشگاهی که محدوده مورد مطالعه برای آبشستگی بود، قرار داده شد. ضخامت مواد بستر با توجه به بیشینه عمق آبشستگی محتمل 30 سانتی‌متر انتخاب گردید. برای شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، بازه 4 متری بالادست و 3 متری پایین‌دست محدوده مورد مطالعه از رسوبات درشت‌دانه که در مرحله الک کردن باقی‌مانده بود، پوشیده شد.

آستانه مورد بررسی شامل صفحه پلاکسی گلاسی به ضخامت 6 میلی‌متر، هم عرض فلوم و ارتفاع 30 سانتی‌متر بود که بصورت عمودی در سه موقعیت بالادست، میانی و پایین‌دست پی نصب گردید. در شکل 2، نمایی از پایه نصب شده و نیز آبشستگی ایجاد شده در مجاورت آستانه نشان داده شده است.



شکل 2 نمایی از موقعیت آستانه و آبشستگی اطراف پایه‌های پل

آزمایش در زمان 25 ساعت اندازه‌گیری گردید.

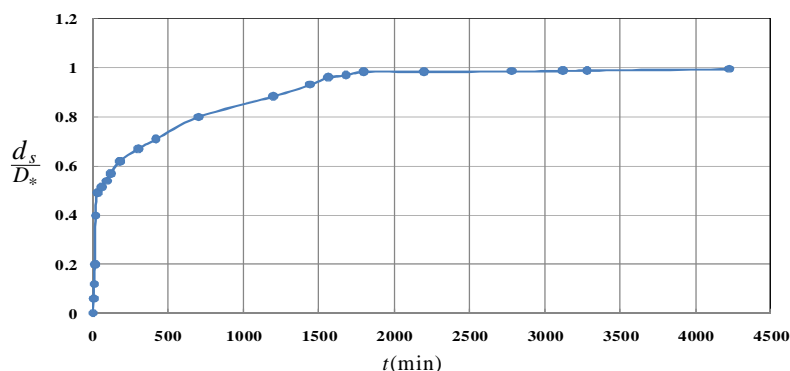
3- تجزیه و تحلیل نتایج

در شکل 4، تأثیر استقرار آستانه بر تغییرات توسعه زمانی آبشستگی برای شرایط مختلف هیدرولیکی و رقوم کارگذاری $z/D_* = 1$ و عمق‌های نسبی جریان 1 و 3 نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، استقرار آستانه در بالادست و قسمت میانی پی باعث کاهش آبشستگی لحظه‌ای نسبت به زمان مشابه در حالت بدون آستانه شد. همچنین کارگذاری آستانه در پایین‌دست پی منجر به آن می‌شود که مقدار لحظه‌ای عمق آبشستگی در مرحله تشکیل چاله آبشستگی در مقایسه با حالت بدون آستانه، کاهش محسوسی یافته، ولی در بازه توسعه‌ای آن، عمق آبشستگی به مقدار بدون آستانه می‌رسد.

برای این منظور، ابتدا آزمایشی به مدت 72 ساعت و با سرعت نسبی (نسبت سرعت جریان به سرعت معادل آستانه حرکت) 0/95 انجام و تغییرات عمق لحظه‌ای آبشستگی با استفاده از عمق‌سنج با دقت 0/1 میلیمتر اندازه‌گیری شد (شکل 3). با مقایسه نتایج حاصل از آبشستگی‌های اندازه‌گیری شده، زمان تعادل 1500 دقیقه که معادل با 25 ساعت بود، حاصل شد.

در مجموع به منظور بررسی تأثیر آستانه، شرایط هیدرولیکی و رقوم کارگذاری بر توسعه زمانی آبشستگی اطراف گروه پایه کج 32 آزمایش انجام شد که دامنه پارامترهای مورد بررسی در جدول 1 ارائه شده است.

لازم به ذکر است به علت عدم امکان اندازه‌گیری مستمر عمق لحظه‌ای آبشستگی در طول زمان 25 ساعت، در کلیه آزمایش‌ها تغییرات آبشستگی به مدت 7 ساعت که تقریباً 75 درصد آبشستگی رخ می‌دهد، بصورت پیوسته اندازه‌گیری و سپس حداکثر عمق آبشستگی بعد از قطع

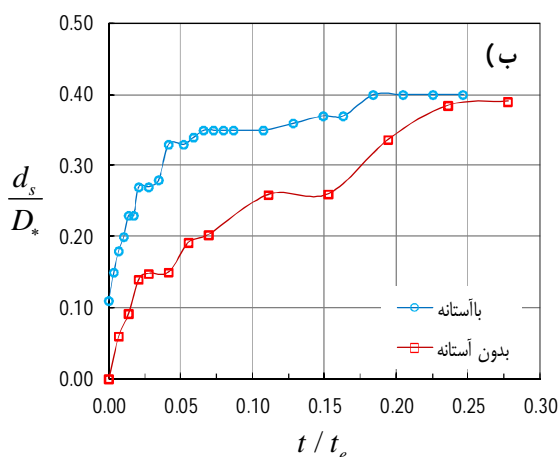
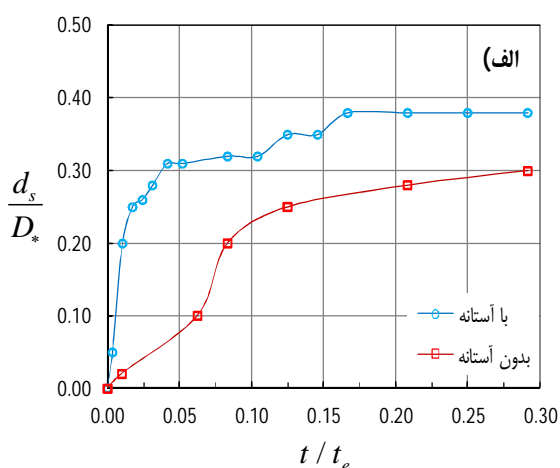


شکل 3 توسعه زمانی آبشستگی برای $U/U_C = 0.95$ و $y/D_* = 1$

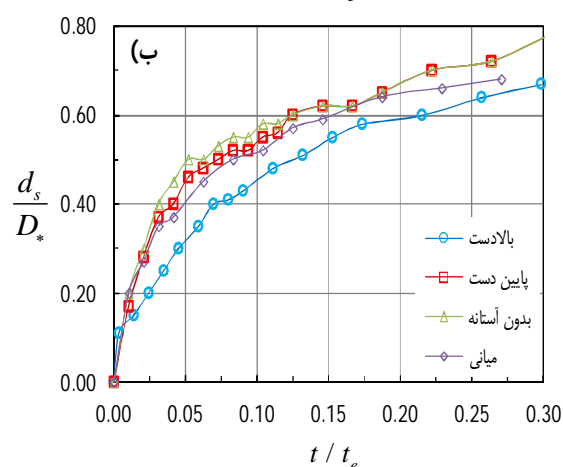
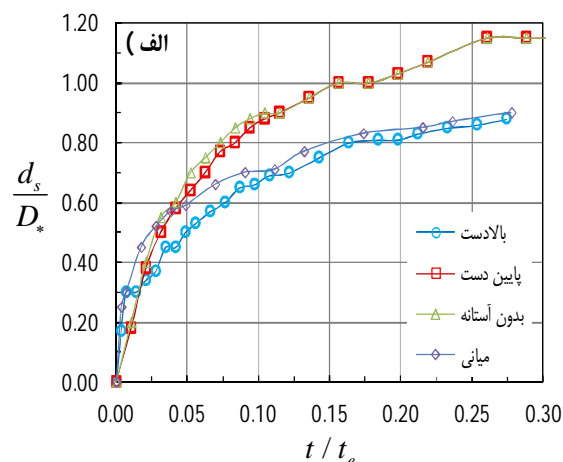
جدول 1 دامنه پارامترهای آزمایشگاهی برای مطالعه تأثیر آستانه در توسعه زمانی آبشستگی

تعداد آزمایش	موقعیت قرارگیری آستانه (L)	دبی جریان (l/s)	سرعت نسبی (U/U_C)	عمق نسبی جریان (y/D_*)	تراز نسبی قرارگیری پی (z/D_*)
6	بالادست، میانی، پایین‌دست	19/3-58	0/95	3 و 1	0
6	بالادست، میانی، پایین‌دست	19/3-58	0/95	3 و 1	1
6	بالادست، میانی، پایین‌دست	19/3-58	0/95	3 و 1	-0/5
6	بالادست، میانی، پایین‌دست	19/3-58	0/95	3 و 1	-1

امکان گسترش چاله آبشستگی به بالادست پی، توسعه آن در جهت عرضی افزایش یافته است. در شکل 6، نمایی از چاله آبشستگی اطراف پی در شرایط مذکور نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌های انجام شده در خصوص کارگذاری آستانه میانی در تراز نسبی کارگذاری مذکور نشان داد که در عمق نسبی 1، تشکیل چاله آبشستگی به تأخیر افتاده است. از آنجاکه در تراز کارگذاری $z/D_* = 0$ آبشستگی از طرفین شروع می‌شود، آستانه میانی تا اندازه‌ای مانع از توسعه آن به بالادست شده و به نوعی در روند توسعه آن تأخیر وارد نموده است، ولی با گذشت زمان، بتدریج گردابه‌های شکل گرفته در چاله آبشستگی در پشت آستانه توانسته رسوبات بالادست آنرا به حرکت در آورده و با عبور از آستانه به بالادست پی برسد.



شکل 5 توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبشستگی در طرفین پی برای آستانه جلویی در $z/D_* = 0$ ، سرعت نسبی 0/95، (الف) عمق نسبی 1 و (ب) عمق نسبی 3



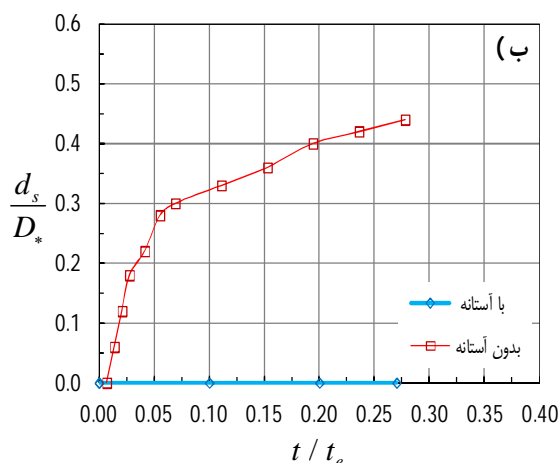
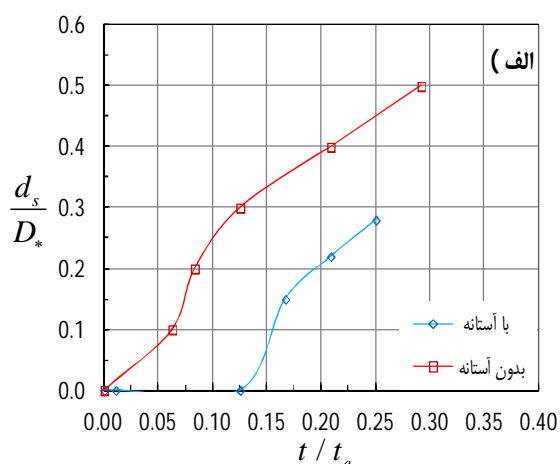
شکل 4 توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبشستگی برای سرعت نسبی 0/95 و $z/D_* = 1$ (الف) عمق نسبی 1 و (ب) عمق نسبی 3

مشاهدات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد که در شرایط تراز نسبی $z/D_* = 0$ ، شکل‌گیری آبشستگی با سایر رقوم‌های استقرار پی متفاوت می‌باشد. در این تراز به دلیل آنکه پی به‌گونه‌ای نقش طوقه را ایفا می‌نماید، آبشستگی آن از طرفین پی شروع شده و سپس به بالادست توسعه می‌یابد. با استقرار آستانه در جلوی پایه، از پیشروی جبهه آبشستگی به بالادست جلوگیری شده و در نتیجه آبشستگی در بالادست شکل نمی‌گیرد. از این رو در این رقوم کارگذاری پی، تغییرات آبشستگی در طرفین پی در طول آزمایش‌ها اندازه‌گیری گردید. تغییرات توسعه زمانی آبشستگی در طرفین پی برای تراز کارگذاری مذکور و عمق‌های نسبی 1 و 3 در شکل 5 آورده شده است. مقایسه‌های صورت گرفته نشان داد که به دلیل عدم



شکل 6 نمایی از چاله آبستگي اطراف پی در تراز نسبی صفر و عمق نسبی 1 و 3

آبستگي از زمان مشابه بدون آستانه کمتر شده است.



شکل 7 توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبستگي در شرایط

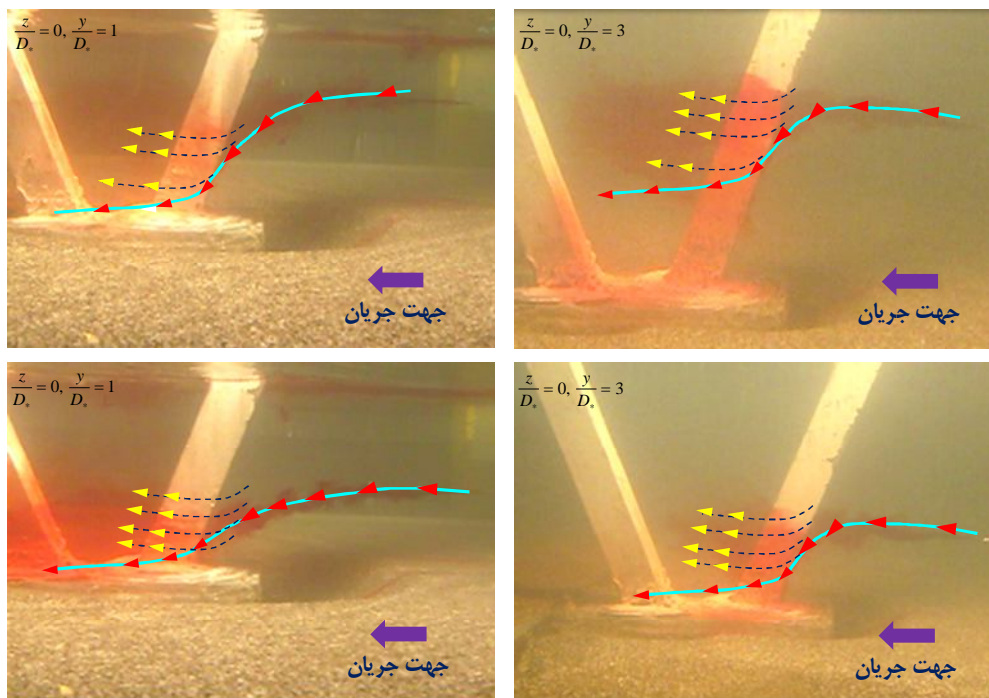
استقرار آستانه میانی، $z/D_* = 0$ ، سرعت نسبی 0.95.

(الف) عمق نسبی 1 و (ب) عمق نسبی 3

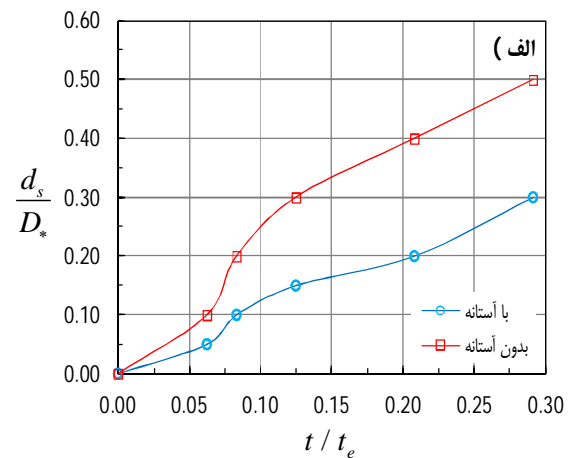
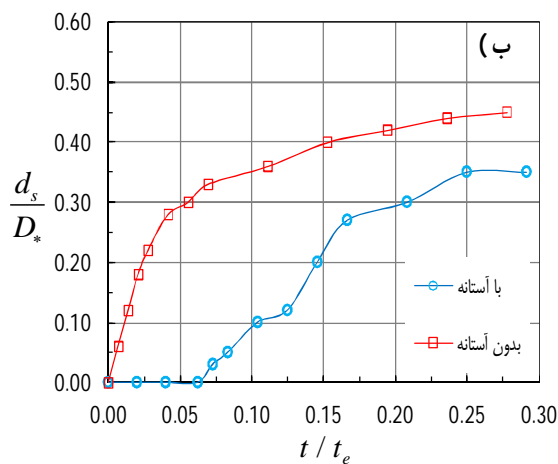
در شکل 7، تغییرات توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبستگي برای عمق‌های نسبی 1 و 3 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در عمق نسبی 3 به دلیل استهلاک بخشی از توان فرساینده‌ی گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی عبوری از پایه اول از سطح به عمق جریان، در طول 8 ساعت آبستگي مشاهده نشد، ولی در عمق نسبی 1 پس از گذشت 180 دقیقه بعد از شروع آزمایش، آبستگي به بالادست پایه رسید. در شکل 8، نمایی از آشکارسازی جریان برای عمق‌های نسبی 1 و 3 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در یک ارتفاع تزریق مشابه، خط جریان در عمق نسبی 3 در فاصله نزدیک‌تری از پایه، حضور آن را احساس می‌نماید، در حالیکه در عمق نسبی 1، خط جریان در فاصله دورتر از پایه به سمت بستر متمایل می‌شود.

آزمایش‌های انجام شده نشان داد که در وضعیت استقرار آستانه انتهایی، توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبستگي دارای آهنگ رشد مشابه با حالت بدون آستانه بوده، ولی از نظر مقدار کمتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل 9، مشخص است توسعه عمق لحظه‌ای آبستگي در عمق نسبی $y/D_* = 3$ ، به دلیل کمتر بودن قدرت گردابه‌ها در مجاورت بستر با تاخیر 90 دقیقه‌ای آغاز شده است، ولی بتدریج با گذشت زمان بر مقدار آن اضافه می‌شود.

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در این شرایط، استقرار آستانه باعث کندی در انتقال رسوبات به پایین‌دست پایه‌ها شده و در نتیجه مقدار لحظه‌ای عمق



شکل 8 آشکارسازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری $z / D_* = 0$ و عمق‌های نسبی مختلف

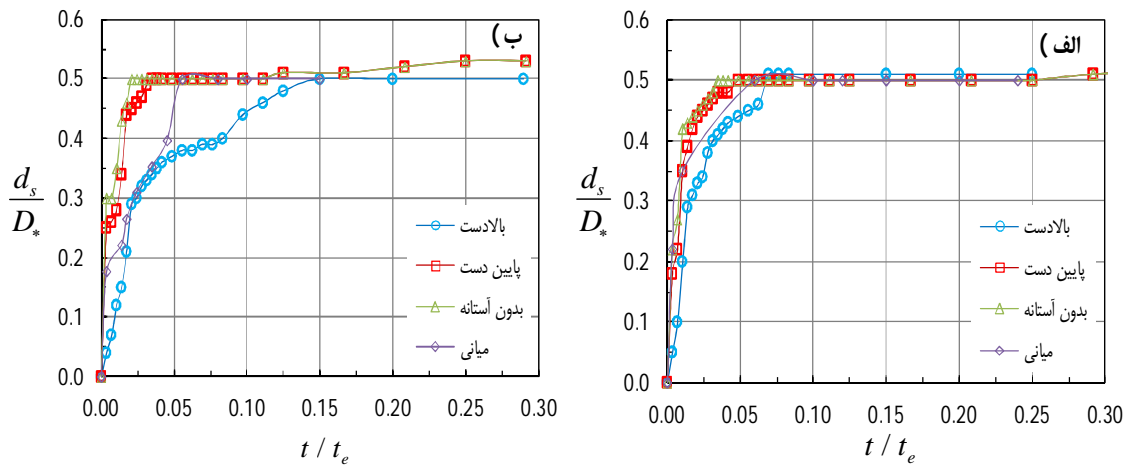


شکل 9 توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبستگي در شرایط استقرار آستانه انتهایی، $z / D_* = 0$ ، سرعت نسبی 0/95،

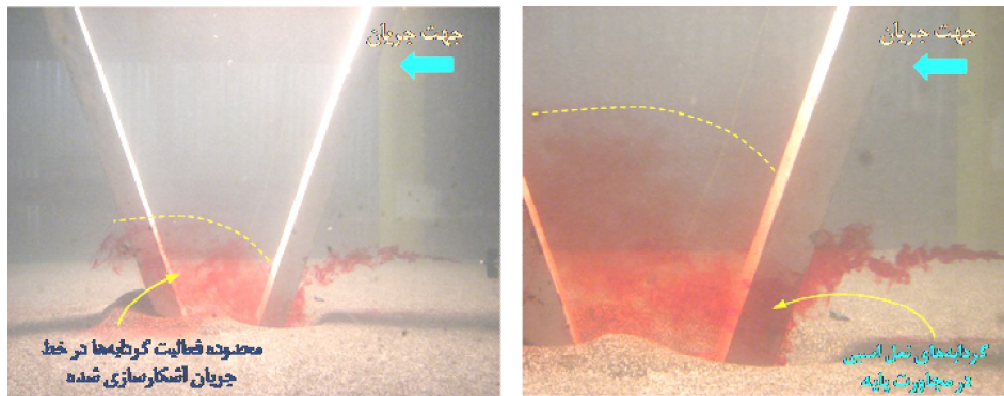
الف) عمق نسبی 1 و ب) عمق نسبی 3

منحنی مربوطه برای شرایط بدون آستانه منطبق می‌شود. در شکل 11، نمایی از آشکارسازی جریان برای عمق کارگذاری مذکور نشان داده شده است. تغییرات توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبستگي برای شرایط $z / D_* = -1$ و عمق نسبی 1 و 3 در شکل 12، آورده شده است. مشابه با شرایط قبلی کارگذاری پی، بطور کلی استقرار آستانه باعث کاهش مقدار عمق لحظه‌ای آبستگي شده است.

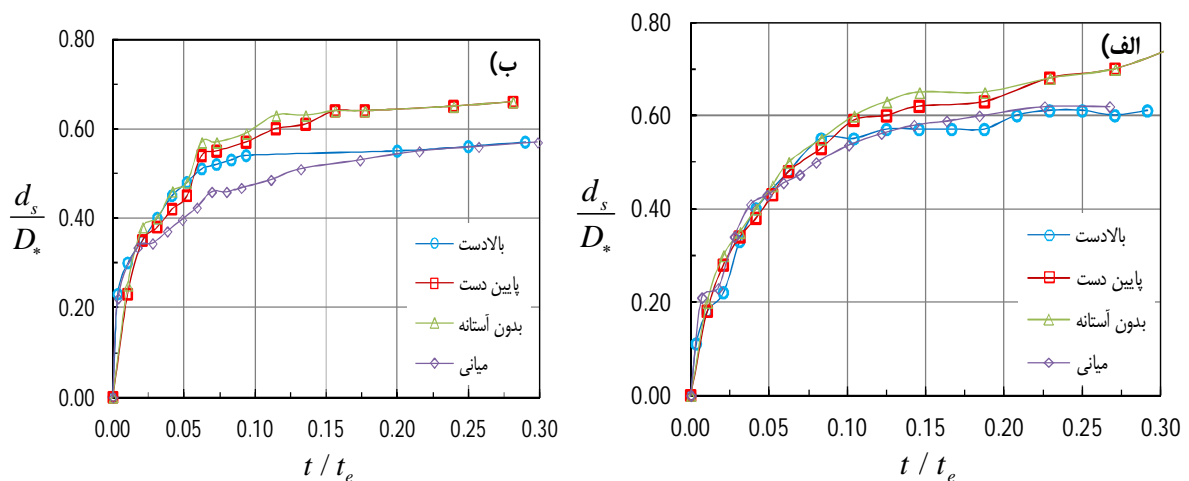
همچنین مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در تراز کارگذاری پی 0/5، چاله آبستگي در مدت زمان کمتر از 5 درصد زمان تعادل (15 دقیقه ابتدایی) به روی پی رسیده و متوقف می‌شود. همانطور که در شکل 10، ملاحظه می‌گردد، حضور آستانه توانسته مقدار توسعه زمانی را به تاخیر اندازد، ولی بتدریج با گذشت زمان از شروع آزمایش، منحنی لحظه‌ای عمق آبستگي به



شکل 10 توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبشستگی برای آستانه جلویی برای سرعت نسبی 0/95 و $z/D_* = -0.5$ (الف) عمق نسبی 1 و (ب) عمق نسبی 3



شکل 11 آشکارسازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری $z/D_* = -0.5$ و عمق نسبی 3



شکل 12 توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبشستگی برای سرعت نسبی 0/95 و عمق نسبی 1 و 3 در $z/D_* = -1$ (الف) عمق نسبی 1 و (ب) عمق نسبی 3

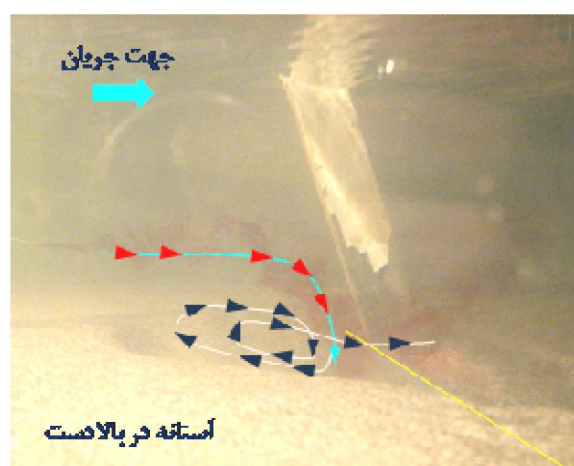
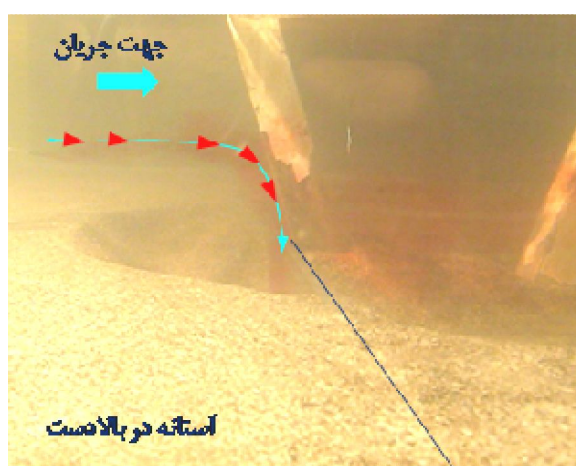
مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در لحظه‌های ابتدایی شکل‌گیری چاله آبستگی، مقدار عمق لحظه‌ای آبستگی برای آستانه بالادست، اندکی از دیگر شرایط کارگذاری آستانه بیشتر می‌باشد. مشاهدات آزمایشگاهی حاصل از آشکارسازی جریان در حین انجام آزمایش‌ها نشان داد که در شرایط کارگذاری آستانه جلویی، چرخش و فعالیت بخشی از گردابه‌های نعل اسبی که وارد چاله آبستگی شده‌اند، به علت حضور آستانه بیشتر شده و در نتیجه مقدار عمق لحظه‌ای آبستگی افزایش می‌یابد. بتدریج با توسعه چاله آبستگی، قدرت گردابه‌ها و در نتیجه مقدار آهنگ توسعه عمق لحظه‌ای آبستگی کمتر شده و منحنی مربوط به آن در زیر سایر منحنی‌های عمق لحظه‌ای آبستگی وارد می‌گردد. در شکل 13، نمایی از آشکارسازی جریان برای آستانه بالادست ارائه شده است.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تاثیر موقعیت قرارگیری آستانه بر توسعه زمانی آبستگی اطراف گروه پایه کج و در ترازهای مختلف کارگذاری پی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استقرار آستانه در بالادست پی باعث کاهش عمق لحظه‌ای آبستگی در کلیه شرایط مورد بررسی می‌شود. مقایسه نتایج مربوط به مقدار آبستگی لحظه‌ای پس از گذشت 7 ساعت از شروع آزمایش نشان داد که در تراز نسبی $(z/D_* = 1)$ استقرار

5- فهرست علائم

d_s	عمق لحظه‌ای آبستگی
B	عرض فلوم آزمایشگاهی
D	عرض پایه پل
D_s	عرض پی



شکل 13 آشکارسازی الگوی جریان برای آستانه جلویی در تراز نسبی کارگذاری $z/D_* = -1$ و عمق نسبی 1

رازی، س. حسین زاده دلیر، ع. سلمانی، ف. و فرسادی زاده، د. (1389). "تأثیر موقعیت آبپایه در کاهش آبشستگی در پایه‌های استوانه‌ای". نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه 1389، دانشگاه تربیت مدرس.

کشاورزی، ع. سیستانی، ب. و رنجبر زاهدانی، م. (1388). "بررسی تأثیر سازه‌های منحرف کننده جریان بر روی آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل‌های استوانه‌ای". هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، اردیبهشت 1388، دانشگاه شیراز.

Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z., and Beheshti, A. A. (2010). "Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers". *J. Hydraul. Eng.*, 136(6): 343–351.

Breusers, N. H. C. and A. J. Raudkivi. (1991). *Hydraulic structure design manual: scouring*. Vol. 2, Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Cardoso, A. H., and Bettess, R. (1999). "Effects of time channel geometry on scour at bridge abutment". *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, 125(4): 388–399.

Chang, W. Y., Lai, J. S., and Yen, C. L. (2004). "Evolution of scour depth at circular bridge piers". *J. Hydraul. Eng.*, 130(9): 905–913.

Coleman, S. E. (2005). "Clear water local scour at complex piers". *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, 131(4): 330–334.

El-Razek, M.A., El-Motaleb, M.A. and Bayoumy, M. (2010). "Scour reduction around bridge piers using internal opening through the pier". *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 42, No. 2, 241–248.

Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A., (2009). "Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill". *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, 135(1): 13–21.

Kothyari, U. C., Garde, R. J., and Ranga Raju, K. G. (1992b). "Temporal variation of scour around circular bridge piers". *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, 118(8): 1091–1106.

Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Pagán-Ortiz, J.E., Zevenbergen, L.W., Arneson, L.A., Schall, J.D., and Girard, L.G. 2009. "Bridge scour and stream instability countermeasures: experience, selection, and design guidance". FHWA, Hydraulic Engineering Circular No. 23.

Lee, s. and Sturm, T.W. (2009). "Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour". *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, 135(10): 793–802.

قطری که 50 درصد ذرات مصالح بستر از آن کوچکتر است

عدد فرود $Fr = U / \sqrt{gy}$

شتاب ثقل g

فاصله قرارگیری آستانه نسبت به دماغه پایه یا پی L

عدد رینولدز $Re = Uy/v$

زمان از شروع آبشستگی t

زمان تعادل آبشستگی t_e

سرعت متوسط جریان U

سرعت جریان برای شرایط آستانه حرکت U_c

عمق جریان y

تراز استقرار پی z

زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان α

زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان β

چگالی آب و ذرات رسوبی ρ و ρ_s

انحراف معیار مصالح رسوبی بستر σ_g

لزوجت دینامیکی μ

6- منابع

اسمعیلی ورکی، م. موسی پور، س. و حاتم جعفری، م. (1392). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط هندسی و هیدرولیکی بر مشخصات آبشستگی اطراف گروه پایه کج با فونداسیون". *مجله پژوهش آب ایران*، سال هفتم، شماره سیزده، ص.ص. 151-141.

حیدرپور، م. افضل‌ی مهر، ح. و نادری بنی، م. (1382). "کنترل و کاهش آبشستگی موضعی در پایه‌های پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف". *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، سال هفتم، شماره سوم، ص.ص. 151-141.

حسینی، س.ح. حسین زاده دلیر، ع. و ارونقی، ه. (1389). "کنترل آبشستگی در اطراف پایه‌های مستطیلی با کاربرد صفحات مستغرق و طوق". نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه 1389، دانشگاه تربیت مدرس.

دبردانی، الف. صانعی، م. و قربانی، ب. (1389). "بررسی تأثیر صفحات مستغرق دو گانه با کول‌های متفاوت در کاهش آبشستگی موضعی پایه پل با استفاده از نمودار زمانی". نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه 1389، دانشگاه تربیت مدرس.

- Oliveto, G., and Hager, W. H. (2002). "Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour". ASCE, J. Hydraul. Eng., 128(9): 811–820.
- Oliveto, G., and Hager, W. H. (2005). "Further results to time-dependent local scour at bridge elements". ASCE, J. Hydraul. Eng., 131(2): 97–105.
- Pagliara, S., Carnacina, L., and Cigni, F. (2010). "Sills and gabions as countermeasures at bridge pier in presence of debris accumulations". Journal of Hydraulic Research Vol. 48(6): 764–774.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical piers". ASCE, J. Hydraul. Eng., 109(3): 339-350.
- Sheppard, D. M., Odeh, M., and Glasser, T. (2004). "Large scale clear water local pier scour experiments". ASCE, J. Hydraul. Eng., 130(10): 957-963.
- Simarro, G, Cristina M., Fael, S, and Cardoso., A. H. (2011). "Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies". ASCE, J. Hydraul. Eng., 137(9): 1089-1093.
- Yanmaz, A. M. (2006). "Temporal variation of clear-water scour at cylindrical bridge piers". Can. J. Civil. Eng., 33: 1098–1102.
- Zarrati, A., Nazariha, M., and Mashahir, M. (2006). "Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap". ASCE, J. Hydraul. Eng., 132(2): 154–162.
- Lu, J.-Y., Shi, Z.-Z., Hong, J.-H., Lee, J.-J., and Raikar, V. K. (2011). "Temporal variation of scour depth at non uniform cylindrical piers". ASCE, J. Hydraul. Eng., 137(1): 45–56.
- Mashahir, M., Zarrati, A., and Mokallaf, E. (2010). "Application of riprap and collar to prevent scouring around rectangular bridge piers". ASCE, J. Hydraul. Eng., 136(3): 183–187.
- Masjedi, A., Bejestan, M. and Esfandi, A. (2010). "Reduction of local scour at a bridge pier using collar in a 180 degree flume bend". Journal of Applied Sciences, 10 (2):124-131.
- Melville, B.W. and Raudkivi, A. J. (1996). "Effect of foundation geometry on bridge pier scour". ASCE, J. Hydraul. Eng., 122 (4): 203-209.
- Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. ASCE, J. Hydraul. Eng., 125 (1): 59-65.
- Melville, B.W. and Sutherland, A.J (1988). "Design method for local scour at bridge piers". ASCE, J. Hydraul. Eng., 114(10): 1210-1226.
- Mia, M. F., and Nago, H. (2003). "Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier". J. Hydraul. Eng., 129(6): 420–427.
- Novak, P. Guinot, V., Jeffrey, A., and Reeve, D.E. (2010). *Hydraulic modeling-an introduction: principles, methods and applications*. CRC Press; First Edition, 616 p.